기술보고

생산유전 시설의 파라핀 침적 초기 진단 프로그램 개발

이재윤¹ · 김대윤¹ · 최재진² · 이채구³ · 김원범^{3*}

¹(주)골든엔지니어링 기업부설연구소 대리, ²(주)골든엔지니어링 대표이사, ³(주)골든엔지니어링 기업부설연구소 이사

Development of a Paraffin Deposition Primary Diagnosis Program for Oil Field Production Facilities

Jaeyoon Lee¹, Daeyun Kim¹, Jaejin Choi², Chaigoo Lee³ and Wonbeom Kim^{3*}

¹Assistant Manager, Department of Research Institute, Golden Engineering Co., Ltd., Seoul, Korea

²Director, Department of Research Institute, Golden Engineering Co., Ltd., Seoul, Korea

³President, Department of Research Institute, Golden Engineering Co., Ltd., Seoul, Korea

*Corresponding Author. Wonbeom Kim, goldeneng.kim@gmail.com, Department of Research Institute, Golden Engineering Co., Ltd., Seoul, Korea

Received

3 December 2020

Final version Received

21 January 2021

Accepted

27 April 2021

Abstract

This study develops a program to suggest the chemical injection rate and workover period by predicting the paraffin deposition characteristics in oil field facilities where paraffin deposition causes flow assurance issues. The program diagnosis paraffin deposition rate and deposited location based on numerical analysis, and its predictability is verified using a machine learning method trained based on simulation results. The program provides a solution suggestion function that maintains the target production rate stably in paraffin deposition occurring fields. The program can be utilized as a primary diagnostic tool for predicting paraffin deposition characteristics even in small and medium-scale oil fields and used efficiently to establish operation plans and improve profitability.

Key words : Oil field facility, Paraffin deposition, Diagnosis program, Chemical injection, Workover period

요약

본 연구에서는 파라핀 침적으로 유동안정성 문제 발생이 예상되는 유전 시설에서 파라핀 침적 양상을 예측하고 화학제 주입량 및 유정보수 주기를 제안하는 프로그램을 개발하였다. 수치해석에 기반하여 파라핀 침적량 및 침적위치를 진단한 후, 시뮬레이션 결과를 학습한 기계학습 방법을 통해 예측 결과의 신뢰성을 검증하였다. 개발된 프로그램은 파라핀 문제가 있는 생산현장에서 안정적으로 생산목표를 유지할 수 있는 솔루션을 제공하는 기능이 포함되어 있어, 영세한 중소규모 유전에서 초기의 파라핀 침적 양상을 진단할 수 있는 툴로 활용될 수 있다. 이를 통한 현장 운영 계획 수립 및 수익성 개선에 효율적으로 활용될 수 있는 프로그램이라고 판단된다.

주요어 : 유전 시설, 파라핀 침적, 진단 프로그램, 화학제 주입, 유정보수 주기

서 론

생산유전 현장에서 원유 생산 및 운송 시 파라핀 침적은 지하의 생산정 및 지상 시설(파이프라인, 저장 탱크)에서 유동안정성(flow assurance)에 영향을 미치는 요인 중 하나이다(Kim *et al.*, 2019). 일반적으로 파라핀은 원유 내에 자연 성분 상태로 존재하며, 온도가 원유의 용해 한계 지점 WAT(Wax Appearance Temperature) 혹은 그 이하로 내려가면 분리되어 나오게 된다. 파라핀 침적이 지속될 경우 관내 유동 면적을 감소시켜 생산량이 점점 감소하게 되고, 악화된 경우 시설 내부를 막아 생산 중단 등 심각한 문제를 야기하므로 주기적인 관리가 필요하다.

이러한 유동안정성 확보를 위해 사용되는 대표적인 시뮬레이터로는 Schlumberger사의 OLGA 소프트웨어가 있다. OLGA는 관내 천이 유동을 비롯한 동적해석을 제공하는 정밀 시뮬레이터로 그 신뢰성을 인정받은 프로그램이다. 하지만, 경제성 유무가 관건인 광구주에게는 광구의 규모에 따라 해석에 필요한 입력자료의 추가 확보 비용, 프로그램 라이선스 비용, 해석 전문 인력 고용 비용을 고려하였을 때, 상용프로그램에 대한 접근성이 매우 떨어질 수 있다.

현재 석유가스 개발사업은 바야흐로 빅데이터와 인공지능(Artificial Intelligence, AI)의 시대에 진입하였으며, 기계학습의 인공신경망(Artificial Neural Network, ANN) 및 이에 기반한 변형모델들이 석유가스 개발사업에 다방면으로 적용되고 있다(Min, 2020). 기계학습의 가장 큰 장점으로는 오픈소스(open-source)로 접근성이 뛰어나다는 점과 기계학습 모델이 적정히 학습될 경우 비전문가도 간편하게 사용할 수 있다는 점이 있다.

이에, 본 연구에서는 중소규모 유전에서 파라핀 침적 관련 정밀분석 수행 여부를 파악하기 위한 초기 진단 시스템 PMS(Paraffin Management System)를 개발하였으며, 해당 진단의 검증에 위해 기계학습을 접목시키는 기술을 제안하였다. PMS는 생산유전에서 발생하는 파라핀 침적 위치 및 위험도를 예측함으로써 화학제 주입량과 유정보수(workover) 주기를 제안하는데 활용할 수 있는 프로그램이다. 개발한 프로그램을 파라핀 침적 문제가 있는 중앙아시아 지역의 현장을 대상으로 사례 연구를 수행하였다.

파라핀 침적

파라핀 침적 원인

파라핀은 탄소 수 C_{18} 부터 C_{65} 까지의 장쇄(long-chain) 고분자량(high-molecular weight) 화합물로(Srivastava *et al.*, 1993), 침적되는 왁스 고형물은 주로 노말 파라핀(normal paraffin)(Fig. 1)으로 구성된 거정질(macrocristalline) 왁스와 이소 파라핀(iso paraffin)과 사이클로 파라핀(cyclo paraffin)으로 구성된 미정질(microcristalline) 왁스로 분류할 수 있다(Lake and Fanchi, 2006). 온도의 영향에 가장 민감하며, 원유의 조성, 주변의 기후 조건, 생산시설의 운영 환경 등이 복합적으로 작용하여 특정 조건이 충족될 경우 파라핀 침적이 발생한다. 일반적인 저류층 온도($T \geq 70^{\circ}C$) 및 압력($p \geq 50 MPa$) 조건에서는 원유 혼합물에 파라핀이 완전히 용해되도록 용해도가 충분히 높게 유지되지만(Singh *et al.*, 2000), 생산 및 수송 과정에서 주변 환경에 의해 온도와 압력이 변화하게 되어 용해도의 변화가 발생한다.

파라핀 침적으로 인한 문제

생산 또는 운송 중 온도가 WAT 또는 운점(cloud point)에 도달하게 되면 파라핀 결정이 원유로부터 석출되어 유동관 내벽을 따라 침적되기 시작하고, 이후 레진, 물, 모래, 아스팔텐, 원유 등이 내부에서 확산 및 경화(aging)되어 고형화된다. 이러한 고형물이 쌓일수록 파이프 내 원유의 유동을 저하시키고, 더 진전된 경우에 유로 차단 수준까지 도달하여 전체 생산시스템에 큰 문제를 발생시킬 위험성이 있다.

파라핀 침적 문제 해결 방법

이러한 파라핀 침적 문제를 처리하기 위해 피깅(pigging) 등 장치로 유동관 내부를 긁어내는 물리적 방법, 파라핀 억제제(inhibitor) 또는 관련 화학제품을 주입하는 화학적 방법, 유동관을 가열하는 직접 가열법(active heating), 유동관의 열전도도를 감소시키는 단열법(passive insulation) 등 다양한 방법이 사용되고 있다.

하지만, 위의 방법들은 이미 침적된 파라핀을 제거하거나 원유 내에 함유되어 있는 침적 유발 성분을 최대한 억제하는 방법으로서, 파라핀이 침적되는 근본적인 원인을 해

Fig. 1. Chemical structure of normal paraffin(C_{23}).

결할 수는 없다. 따라서, 지속적으로 발생하는 파라핀 침적 문제로 인해 발생할 수 있는 생산 지연 및 중단기간(down time)을 예방하여 수백만 달러의 손실이 발생하지 않도록 적정한 광구 운영 계획의 수립이 필수적이다(Nazar *et al.*, 2001).

이러한 효율적인 광구 운영 계획의 수립을 위해 대형 유전을 운영하는 메이저 기업의 경우에는 전문가 그룹이 다양한 실험과 시뮬레이션 방법 등을 활용하여 면밀하게 관리하며 운영계획을 수립하는 것이 가능하지만, 영세한 중소규모 유전은 기술인력 부족과 경제적 부담으로 체계적으로 관리가 되지 못하고 있는 실정이다. 본 연구에서는 현장에서 일반적으로 구하기 용이한 기온정보, 설비정보, 유정정보 등을 활용하여 파라핀의 침적문제를 간편하게 진단할 수 있는 프로그램을 개발하였다. 이를 통해 현장 운영사가 파라핀 침적문제를 초기에 판단할 수 있는 근거로 활용함으로써 향후 현장 운영 계획 수립에 도움을 제공하고자 한다.

프로그램 개발

프로그램 개요

본 연구에서는 전문적인 기술과 다양한 입력자료가 필요한 고가의 상용프로그램 도입에 앞서, 현장에서 쉽게 구할 수 있는 데이터를 기반으로 파라핀의 침적을 초기 진단할 수 있는 Microsoft사 Windows 기반의 프로그램을 개발하였다. 생산유전 시설의 파라핀 침적 양상을 예측하고, 화학적 방법인 억제제 주입량을 제시하는 다음과 같은 주요 기능을 탑재하고 있다. Fig. 2는 PMS의 구성 개념도이다.

- 1) 수직 생산정 내 파라핀 침적 양상 예측
유정완결된 지역의 물성치 및 제원을 통해 생산 시 관 내 온도변화를 계산하여 파라핀의 침적 양상을 예측한다.
- 2) 유동관 내 파라핀 침적 양상 예측
유동관이 설치된 지역의 물성치 및 제원과 지역별 기

Fig. 2. Program structure of PMS.

후변화를 고려한 매설 심도별 온도변화 예측 후, 파라핀 침적량을 계산하여 침적 양상을 예측한다.

- 3) 기계학습기반 예측 타당성 교차 검증(적합도 검사)
파라핀 문제가 발생한 현장의 데이터를 기초로 다양한 조건에서 시뮬레이션을 수행하여 학습데이터를 생성한 기계학습 툴로 PMS 예측 결과의 신뢰성을 검증한다.
- 4) 파라핀 침적 억제제 주입량 및 유정보수 주기 산정
예측한 파라핀 침적 양상 결과를 바탕으로 억제제 투입량과 유정보수 주기를 제안한다.

개발도구 및 환경

프로그램은 MathWorks사 MATLAB™(Mathworks Inc., 1996) 코드를 기반으로 작성하였으며 그래픽 사용자 인터페이스 모듈을 이용하여 구현하였다. 수치해석 및 프로그래밍 환경을 제공하는 MATLAB™은 행렬 기반으로 계산 기능을 지원하여 계산 속도가 빠르며, 함수나 데이터를 그림으로 그리는 등 알고리즘 구현에 최적화되어있는 코드이다.

수치해석

수치해석은 주입구(inlet) 지점과 배출구(outlet) 지점의 운영 현황과 WAT에 기반한 “침적위치예측”, 식 (1)과 같이 유체 물성 및 분자 확산(molecular diffusion)에 기반한 “침적속도 도출 및 두께 계산”, 파이프 단면적 대비 침적 면적에 기반한 “침적률 계산” 순으로 진행하였다. 또한, 수치해석 시 지역의 기온 및 매설 심도에 따라 온도구배 양상이 변화(Lee *et al.*, 2020)하는 수평 유동관의 경우 이를 반영할 수 있는 인자를 추가 고려하였다.

$$v_{paraffin} = \frac{D_{wo}(C_{wb} - C_{ws})M_{paraffin}}{\delta_{lam}\rho_{paraffin}} \quad (1)$$

이때, $v_{paraffin}$ 은 파라핀 침적 속도, D_{wo} 는 확산계수, C_{wb} 는 bulk 오일 내 녹아있는 왁스 성분의 몰농도, C_{ws} 는 집적표면의 오일 내 녹아있는 왁스 성분의 몰농도, $M_{paraffin}$ 는 파라핀 성분의 몰중량, δ_{lam} 는 점성하위층 두께, $\rho_{paraffin}$ 은 파라핀 성분의 밀도를 의미한다.

기계학습

기계학습 모델은 Tensor flow의 오픈소스 라이브러리를 기반으로 구축하였으며, 데이터 생성을 위한 “현장 데이터 기반 시뮬레이션 수행”, 시뮬레이션 내의 입력 인자 중 파라핀 침적에 영향이 큰 인자를 선별하는 “최적 인자 선정”, 선정된 인자를 바탕으로 다량의 데이터를 동일한 서식으로 전처리하는 “학습데이터 구축”, 구축된 데이터를 기반으로

최적의 예측 알고리즘을 제작하는 “모델학습” 순으로 진행하였다.

최적 인자로 생산량, 주입구 온도, 주변(ambient) 온도, 유동관 내경을 선정하여 다양한 조건의 시뮬레이션을 통해 학습데이터를 생성하였다. 학습 모델은 Keras의 Sequential model, Dense layer, Adam optimizers로 구성하였고, 검증 데이터 비율은 10%로 설정하였다.

적합도 검사

파라핀 침적 예측 결과의 신뢰성을 높이기 위해 수치해석과 기계학습 결과를 교차 검증하였다. 이때, 값의 형태로 나온 수치해석 결과는 침적 위험도/위험 구간(section)을 동일한 인덱스(index)로 표현하여 비교하였다. 침적 위험도는 침적 경중에 따라 알파벳(A~E)으로 표현하였고, 위험 구간은 전체 유동관을 일정 구간으로 등분한 뒤 최대 침적 위치를 포함하는 구간을 아라비아숫자(1~10)로 표현하였다. 적합 기준은 위험도는 동일해야 하며, 위험 구간의 경우 1개 구간의 오차를 허용하였다. 두 결과가 적합 기준에 부합하면 다음 단계인 최적 주입량 및 유정보수 주기 설계 단계를 진행하고, 부적합 시 데이터 재검토 및 운영시설 점검 등 추가 분석을 통해 정밀 원인 파악 단계를 진행한다.

솔루션 제시

본 프로그램의 활용을 통해 파라핀 침적 여부와 위험도를 제시하고, 현장 운영 설계에 참고할 수 있는 억제제 주입량 및 유정보수 주기 설계 솔루션을 제시하고자 한다. 침적 위험도는 전체유동 면적 대비 파라핀 침적 면적으로 계산된 침적률에 따라 안전단계 A, 점검단계 B, 저농도 억제제 주입단계 C, 중농도 억제제 주입단계 D, 고농도 억제제 주입단계 E 다섯 단계로 구분하였다. 해당 단계는 본 연구를 통해 파라핀 문제가 발생한 현장 조건과 개발한 억제제의

Fig. 3. Example of paraffin deposition risk stage.

성능테스트 결과를 종합적으로 분석하여 억제제 적용 시점 가이드라인을 단계별로 제시한 것으로써, 안전단계 A를 제외하고는 화학제품의 억제율, 유정 일 평균 생산량 등을 기반으로 파라핀 주입량을 제안하였고, 최적의 유정보수 주기를 제시하였다. Fig. 3은 유동관 내경이 98 mm인 현장에서 약 90일간 침적량을 예측한 결과의 침적 위험도 분류 예시이며, D 단계와 E 단계의 경우 화학제품 주입 비용과 주기성 유정보수 간의 경제성 비교 연구를 추가로 수행하여 최적의 솔루션을 제시할 예정이다.

현장 적용 사례

중앙아시아 A 광구에서의 성능 검증

개발된 프로그램을 중앙아시아 A 광구의 현장 데이터를 바탕으로 초기 진단하였다. A 광구는 연중 기온이 최저 영하 48°C 이하 최고 영상 43°C로 극단적인 연교차의 기후를 가진 지역에 위치해 있으며, 잦은 파라핀 침적 문제가 발생하여 이를 처리하기 위해 주기적으로 유정보수를 수행하고 있다. 현장 시설물 중 파라핀 침적이 발생한 이력이 있는 유동관을 대상으로 진단을 수행하였으며, 수치해석에 사용된 인자는 Table 1과 같다.

Table 1. Summary of numerical analysis parameters in field A

Parameter	Value	Unit
Production rate	14.3	m ³ /day
Inlet temperature	44	°C
Annual average temperature	11.71	°C
Annual amplitude of monthly average temperature	13.25	°C
Ambient temperature	12.28	°C
Burial depth	5	m
Paraffin dissolved in oil	16	mol/m ³
Molecular weight	0.143	kg/mol
Wax appearance temperature	31	°C
Sub-laminar thickness	0.055	mm
Flowline length	500	m
Flowline I.D.	98	mm

Fig. 4. Result of numerical analysis in field A.

Fig. 4는 해당 광구를 대상으로 수치해석을 진행한 후에 심도별 연간 토양온도 변화 “Ground temperature”와, 유동관 위치별 파라핀 침적 양상 예측 “Paraffin deposition”이 포함된 PMS 결과 화면을 나타낸다.

파라핀 침적은 대상물 주변의 외부온도 변화에 크게 영향을 받기 때문에 프로그램에 반영한 온도값에 따라 진단 결과의 정확도가 결정된다. Fig. 4 상단에 위치한 심도별 연간 토양온도 변화 그래프에 따르면 해당 유동관이 매설되어 있는 심도 5m의 경우 지표 기온과 상이한 11.15~12.28°C의 온도범위를 갖는 것을 알 수 있으며 이를 반영한 90일 간의 파라핀 침적 양상 예측을 수행하였다.

중단의 빨간색 점선 상자로 표시한 유동관 위치별 파라핀 침적 양상 그래프에 따르면 파라핀 최대 침적위치는 137 m 지점으로 제3 구간에 위치해 있으며, 침적 위험도는 중농도 억제제 주입 단계(3C)로 분석되었다.

Fig. 5는 PMS 예측 결과의 신뢰성 검증을 위해 구현한 기계학습 모델이다. 각 Dense layer 당 10개의 뉴런으로 구성하였고, 분류 문제로 Softmax 함수를 통해 Output이 출력된다. 본 모델은 파라핀 문제가 발생한 현장 조건을 바탕으로 다양한 조건의 시뮬레이션을 실시하여 학습데이터를 확보하였고, 현재까지 구축한 학습데이터를 기준으로 73%의 정확도를 보여주고 있다(Fig. 6).

학습된 기계학습 모델과 PMS의 수치해석 결과를 서로

Fig. 5. Structure of machine learning diagnosis.

Fig. 6. Test results of machine learning model.

Fig. 7. Workover period estimation result of developed PMS program.

비교하여 정확도를 교차 검증할 수 있도록 하였으며, 침적 경중에 기반한 침적 위험도와 침적 위치를 비교하였다. 침적 위험도의 경우 두 결과가 동일한 위험도를 도출해야 하며, 침적 위치의 경우 1개 구간의 오차 내에서는 적합으로 판단하였다. 본 현장 사례의 경우에는 수치해석과 기계학습 모두 침적 구간 및 위험도를 “3C”로 동일하게 예측하여 신뢰할 수 있는 진단 결과라고 판단하였다.

PMS는 파라핀 침적 진단 결과를 기반으로 화학적 억제제 주입량을 설계하는 기능을 포함하고 있다. 본 현장 사례의 경우에는 위험도 C단계로 억제율이 80%인 맞춤형 파라핀 억제제(Kim *et al.*, 2019)를 500 PPM으로 주입할 경우 기존 현장운영 상황과 대비하여 파라핀 침적 억제효과를 확보할 수 있어, 이를 통해 기존 유정보수 주기 동안 안정적으로 생산목표를 유지할 수 있는 솔루션을 Fig. 7과 같이 제시할 수 있다. 이때, Fig. 7의 빨간색 그래프는 화학제 투입 전의 파라핀 침적 양상 및 유정보수 주기를 나타내며, 파란색 그래프는 화학제 투입 후의 파라핀 침적 양상 및 유정보수 주기를 나타낸다.

결 론

본 연구는 파라핀 침적문제가 의심되는 중소규모의 유전 운영사가 고비용이 소요되는 전문진단을 수행하기 어려운 현실을 반영하여, 초기에 문제 해법을 찾을 수 있도록 파라핀 침적 진단이 가능한 프로그램을 개발하였다. 본 프로그램은 수치해석을 통한 초기 진단 결과의 신뢰성을 검증하기 위해 기계학습을 활용하여 적합도를 평가하였으며, 진

단 결과에 따라 화학적 억제제를 활용한 주입설계 및 최적 유정보수 운영 등의 솔루션을 제안할 수 있도록 구성하였다.

개발된 프로그램은 중앙아시아 지역의 생산유전을 대상으로 유동관의 파라핀 침적 여부를 진단하는 사례 연구를 수행하여 파라핀 억제제 주입 계획을 제시하였다.

본 연구에서 개발된 프로그램은 영세한 중소규모 생산유전에서 파라핀 침적문제 여부를 확인할 수 있는 초기 진단 툴로 활용함으로써 이후 현장 운영 계획 수립 및 수익성 개선 등의 솔루션 제시에 활용할 수 있을 것이며, 꾸준한 현장 검증을 통해 완성도를 높일 계획이다.

사 사

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다 (No.20182510102400).

References

- Kim, W.B., Ahn, T.W., Paeng, K.J., Lee, D.S., Jeon, B.H., Kim, D.H., and Choi, J.J., 2019. Study on the cause of paraffin deposition using comprehensive two-dimensional gas chromatography. *Journal of The Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers*, 56(5), p.613-621.
- Lake, L.W., and Fanchi, J.R., 2006. Petroleum Engineering Handbook: Vol. 1 General Engineering. *Society of Petroleum Engineers*, Richardson, TX, p.397-453.

- Lee, J.Y., Kim, D.Y., Jung, H.W., Choi, J.J., Eom, K.H., Jung, H.S., and Kim, W.B. 2020. Parametric study on the determinants affecting paraffin deposition in producing oil field facilities. *Journal of The Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers*, 57(1), p.68-76.
- Mathworks Inc., 1996, MATLAB – the Language of Technical Computing, <http://www.mathworks.com/>, [Online; accessed 06-Feb-2020].
- Min, B., Kwon, S., Park, K., Jeong, D., and Lee, H. 2020. Current status and prospects of artificial intelligence in the oil and gas exploration and production business. *Journal of The Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers*, 57(3), p.295-308.
- Nazar, M.R., and Dabir, B., 2001. Measurement and modeling of wax deposition in crude oil pipelines. *SPE Latin American and Caribbean Petroleum Engineering Conference*, Soc. Petrol. Eng., Buenos Aires, Argentina.
- Singh, P., Venkatesan, R., and Fogler, H.S., 2000. Formation and aging of incipient thin film wax-oil gels. *AIChE Journal*, 46(5), p.1059-1074.
- Srivastava, S.P., Handoo, J., Agrawal, K.M., and Joshi, G.C., 1993. Phase-transition studies in n-alkanes and petroleum-related waxes—A review. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 54(6), p.639-670.

이 재 윤

현재 ㈜골든엔지니어링 기업부설연구소 대리
(本學會誌 第57卷 第1号 参照)

최 재 진

현재 ㈜골든엔지니어링 대표이사
(本學會誌 第57卷 第1号 参照)

김 원 범

현재 ㈜골든엔지니어링 기업부설연구소 이사
(本學會誌 第57卷 第1号 参照)

김 대 윤

㈜골든엔지니어링 기업부설연구소 대리
(本學會誌 第57卷 第1号 参照)

이 채 구

1987년 한양대학교 공과대학 자원공학과
학사
1989년 한양대학교 공과대학 자원공학과
석사

현재 ㈜골든엔지니어링 기업부설연구소 이사
(E-mail; goldeneng.richard@gmail.com)